



Visualização e Análise de Índice de Cintilação S4 por meio de Receptores Terrestres e Embarcados em Satélites LEO

Visualization and Analysis of Ionospheric Irregularities by Onboard and Ground Receivers

Raphael Silva Nespolo ¹, Gabriel Oliveira Jerez ² e Daniele Barroca Marra Alves ³

¹ Universidade Estadual Paulista, Departamento de Cartografia, Presidente Prudente, Brasil. raphael.nespolo@unesp.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3696-1359>

² Universidade Estadual Paulista, Departamento de Cartografia, Presidente Prudente, Brasil. gabriel.jerez@unesp.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6893-2144>

³ Universidade Estadual Paulista, Departamento de Cartografia, Presidente Prudente, Brasil. daniele.barroca@unesp.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9033-8499>

Recebido: 10.2025 | Aceito: 06.2026

Resumo: A rádio ocultação (RO) é uma técnica de sensoriamento remoto que explora a refração de sinais eletromagnéticos na atmosfera, permitindo sua investigação em diferentes camadas. No contexto deste trabalho, se baseou na refração dos sinais emitidos por satélites GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) e captados por satélites de baixa órbita (LEO – *Low Earth Orbit*). A técnica permite recuperar índices de refração que, por meio de processamentos e técnicas de inversão, fornecem parâmetros atmosféricos. A ionosfera, composta por partículas ionizadas e elétrons livres, afeta os sinais GNSS devido à refração proporcional ao TEC (*Total Electron Content*). Na região equatorial, a ionosfera apresenta TEC significativamente alto devido à Anomalia da Ionização Equatorial. Algumas irregularidades nesse meio também podem causar cintilação ionosférica, o que influencia na qualidade dos sinais GNSS. No Brasil, estações de monitoramento terrestre foram estabelecidas para monitorar a cintilação ionosférica, possuindo receptores GNSS que registram variações na amplitude e fase dos sinais. Nesse sentido, o principal objetivo deste trabalho consiste na exploração de dados de rádio ocultação mediante uso do índice de cintilação ionosférica S4, e sua validação a partir de dados provenientes de estações de monitoramento, localizadas na região equatorial. Os resultados das análises dos dados de RO-GNSS permitiram visualizar o comportamento das irregularidades ionosféricas, tanto em nível regional quanto global. Além disso, constatou-se uma compatibilidade com os dados de estações terrestres. Os valores de RMSE médio de S4 variaram entre 0,028 e 0,066, enquanto o erro relativo médio oscilou de 35,67% a 46,65%. Os menores erros ocorreram na estação POAL, situada em latitude média, evidenciando a influência da localização geográfica nas cintilações.

Palavras-chave: Ionosfera. GNSS. Rádio ocultação. S4.

Abstract: Radio occultation (RO) is a remote sensing technique that exploits the refraction of electromagnetic signals in the atmosphere, allowing for their investigation across different layers. In the context of this study, the research was based on the refraction of signals emitted by GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) satellites and received by low-Earth orbit (LEO) satellites. This technique makes it possible to determine refractive indices, which, through processing and inversion techniques, provide atmospheric parameters. The ionosphere, composed of ionized particles and free electrons, affects GNSS signals due to refraction proportional to the TEC (*Total Electron Content*). In the equatorial region, the ionosphere exhibits a significantly high TEC due to the Equatorial Ionization Anomaly. Certain irregularities in this medium can also cause ionospheric scintillation, which affects the quality of GNSS signals. In Brazil, ground-based monitoring stations have been established to monitor ionospheric scintillation; these stations are equipped with GNSS receivers that record variations in the amplitude and phase of the signals. In this regard, the main objective of this study is to analyze radio occultation data using the S4 ionospheric scintillation index and to validate it using data from monitoring stations located in the equatorial region. The results of the RO-GNSS data analyses made it possible to visualize the behavior of ionospheric irregularities at both the regional and global levels. Furthermore, consistency with data from ground stations was observed. The mean RMSE values for S4 ranged from 0.028 to 0.066, while the mean relative error ranged from 35.67% to 46.65%. The smallest errors occurred at the POAL station, located at a mid-latitude, highlighting the influence of geographic location on scintillations.

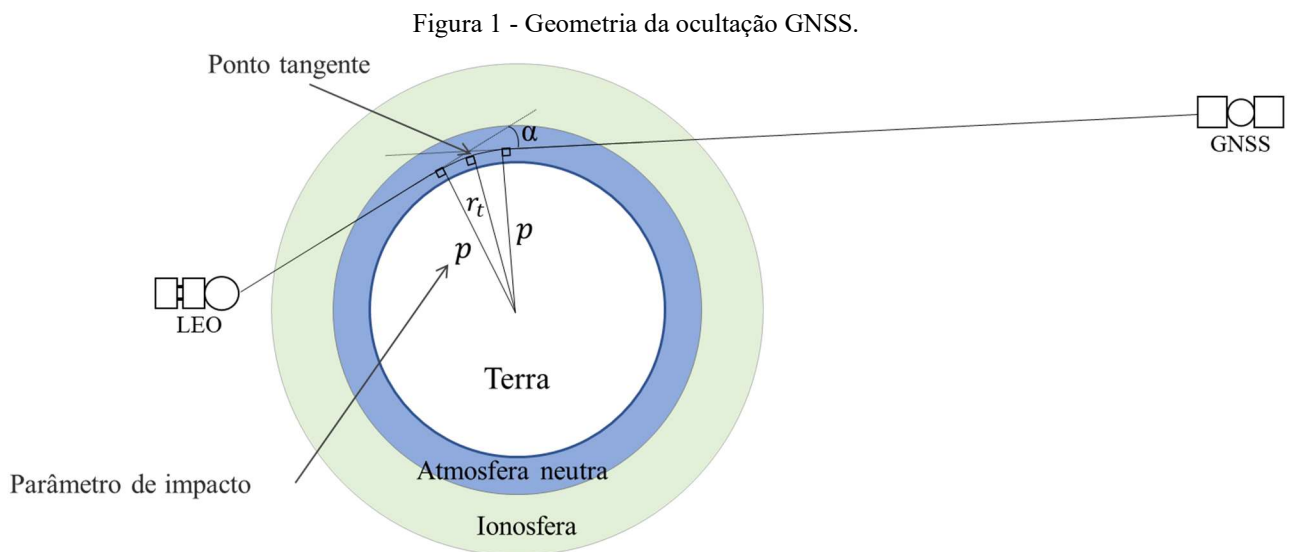
Keywords: Ionosphere. GNSS. Radio occultation. S4.

1 INTRODUÇÃO

A técnica de Rádio Ocultação (RO) tem por princípio a coleta de informações que permitem a investigação da atmosfera terrestre. É caracterizada pelo sensoriamento remoto de alterações na propagação de sinais eletromagnéticos, sendo estas alterações ocasionadas pelo efeito de refração atmosférica. Com o surgimento e expansão das constelações de satélites GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) e LEO (*Low Earth Orbit*), a RO-GNSS tornou-se uma ferramenta importante para estudos atmosféricos (Kursinski et al., 2000; Hajj et al., 2002).

A RO-GNSS opera com base na utilização de dois satélites ocultos pelo planeta, sendo um GNSS, responsável pela emissão de sinais, e um LEO com receptor embarcado. O sinal coletado fornece informações sobre as camadas atmosféricas, como a densidade eletrônica e o TEC (*Total Electron Content* – Conteúdo Total de Elétrons), provenientes da camada ionosférica, além de possibilitar a estimativa do índice S4 (Kursinski et al., 2000; Hajj et al., 2002). Desde a década de 1990, diversas missões de RO-GNSS foram lançadas, com destaque para a missão COSMIC (*Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate*). Os dados coletados por esta e outras missões são processados e disponibilizados por centros como o CDAAC (*COSMIC Data Analysis and Archive Center*) (CDAAC, 2026).

O fato da não necessidade de intervisibilidade entre os satélites é explicado por meio da refração atmosférica. Este fenômeno ocorre quando o sinal eletromagnético atravessa meios de diferentes densidades, fazendo com que a propagação descreva uma linha curva, unindo o satélite transmissor e o satélite receptor (Kursinski et al., 1997; 2000). A refração caracteriza-se pelos ângulos de curvatura (α) e pelo parâmetro de impacto (p), observados na Figura 1. O primeiro corresponde ao ângulo entre o raio de visada do sinal antes e depois da passagem pela atmosfera, enquanto o segundo corresponde à distância entre o centro da Terra e o prolongamento do traçado que representa o caminho do sinal no vácuo (Elgered; Wickert, 2017).



Fonte: Adaptado de Jerez (2019).

O processo de ocultação, devido ao movimento dos satélites envolvidos, alcança uma duração de aproximadamente três minutos (Kursinski et al., 2000). A recuperação dos perfis atmosféricos pode ser compreendida em duas etapas. Em primeiro lugar, determina-se o perfil do ângulo de refração em função do parâmetro de impacto ($\alpha(p)$) a partir de variações na relação sinal/ruído e no atraso do excesso de fase. Em seguida, $\alpha(p)$ é invertido por meio da aplicação da transformada de Abel, ou inversa de Abel, permitindo a obtenção dos índices de refração e, consequentemente, a construção dos perfis verticais de temperatura, pressão, vapor d'água e densidade eletrônica (Hajj et al., 2002; Aragon-Angel et al., 2010).

O sinal GNSS, ao atravessar regiões com irregularidades ionosféricas, caracterizadas por estruturas espaciais associadas a fortes gradientes de densidade eletrônica, pode sofrer cintilação ionosférica. Este efeito se manifesta como flutuações na amplitude e fase de uma onda eletromagnética, sendo diretamente causado pela variação de densidade de elétrons na camada (Rodrigues, 2003). Cintilações de amplitude intensas podem

reduzir rapidamente a razão portadora-ruído, levando à perda de rastreamento do sinal GNSS e à redução da precisão na navegação (Seo et al., 2009; Akala et al., 2012; Conker et al., 2003; Spogli et al., 2013; Moraes et al., 2014; Vani et al., 2019). De forma similar, cintilações de fase podem causar falhas no bloqueio de fase, resultando em saltos de ciclo (Sreeja et al., 2011). Irregularidades em escalas menores que a escala de Fresnel atuam como fontes secundárias de onda, causando interferência por difração no receptor (Ghobadi et al., 2020; Wernik et al., 2003). Essas irregularidades são frequentemente geradas por bolhas de plasma equatoriais, que são estruturas ionosféricas de grande escala com baixa densidade de elétrons em relação ao ambiente. Elas surgem após o pôr do sol local e se propagam ao longo das linhas do campo magnético, atingindo as cristas da EIA (*Equatorial Ionization Anomaly*), onde a densidade eletrônica é mais alta e as cintilações mais intensas (Burke et al., 2004; De Rezende et al., 2007; Muella et al., 2017; Li et al., 2020).

Em termos regionais, no setor da América do Sul, especialmente na região da AMAS (Anomalia Magnética do Atlântico Sul), a precipitação de partículas do cinturão de radiação interno aumenta a condutividade ionosférica, intensificando as irregularidades que provocam cintilação nos sinais GNSS (Abdu et al., 2005; Spogli et al., 2013). A ocorrência dessas cintilações está associada à atividade solar e apresenta variações sazonais, com maior incidência durante os equinócios e no verão. Em geral, os episódios de cintilação atingem seu pico entre uma e duas horas após o pôr do sol ionosférico, estendendo-se até a meia-noite local, sendo mais frequentes nas cristas da EIA e na própria AMAS (Muella et al., 2017; Akala et al., 2017; Hofmann-Wellenhof et al., 2008; Kelley, 2009). A EIA está associada ao movimento de elevação e descida do plasma ao longo das linhas do campo magnético, acarretando o surgimento de duas regiões de alta concentração de densidade de elétrons nas regiões subtropicais ao norte e ao sul do equador geomagnético (McNamara, 1991; Seeber, 2003; Monico, 2008). Para a quantificação desses efeitos utiliza-se o índice S4, um parâmetro adimensional que permite classificar a cintilação como fraca, moderada ou forte. Os maiores valores de S4 são observados nas regiões situadas a aproximadamente $\pm 10^\circ$ de latitude geomagnética (Wanninger, 1993). Outro índice amplamente utilizado é o sigma-phi, que representa o desvio-padrão da fase do sinal GNSS e complementa a análise da atividade ionosférica (Van Dierendonck et al., 1993).

Diversos estudos têm sido desenvolvidos para o monitoramento da atividade ionosférica utilizando receptores terrestres. Trabalhos como Pereira e Camargo (2017) exploram o monitoramento da camada ionosférica utilizando fase e pseudodistâncias de estações de redes ativas, como a RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS). Essas abordagens apresentam boa resolução temporal, porém são limitadas pela distribuição espacial das estações, especialmente em regiões com menor densidade de cobertura.

Neste contexto, os dados provenientes de RO-GNSS têm se destacado como uma alternativa promissora, devido à capacidade de fornecer cobertura global e perfis verticais da atmosfera. Pesquisas vêm sendo realizadas a fim de melhor compreender o comportamento da ionosfera a partir de dados de RO. Destacam-se os estudos de Chen et al. (2021) e Liu et al. (2022), que utilizaram dados da técnica para monitorar e compreender as irregularidades do plasma ionosférico em tempo real. Outros trabalhos, como o de Yamazaki et al. (2022) e Wu (2020), exploraram a formação e o impacto das camadas ionosféricas.

Apesar desses avanços, a utilização de dados de RO-GNSS para a análise de cintilação ionosférica ainda apresenta limitações. Observa-se que a maioria dos trabalhos se concentra na detecção qualitativa de irregularidades, sem uma avaliação mais aprofundada de parâmetros quantitativos, como o índice S4. Além disso, análises comparativas entre dados obtidos por sensores embarcados e observações provenientes de estações terrestres ainda são escassas. Nesse sentido, os trabalhos de Groves et al. (2009) e Tang et al. (2023) representam algumas das poucas iniciativas de comparação entre medições de cintilação obtidas por diferentes plataformas, evidenciando discrepâncias associadas à geometria de observação e à resolução espacial dos dados.

Dessa forma, ainda permanece como lacuna na literatura a realização de estudos que integrem dados de RO-GNSS e observações terrestres para a análise de índices de cintilação ionosférica. Essa integração é fundamental para a validação da confiabilidade dos dados e para o avanço de aplicações voltadas ao monitoramento global da ionosfera.

Diante desse cenário, o presente trabalho tem por objetivo comparar os dados de índice S4, obtidos a partir de receptores embarcados em satélites LEO por meio da RO-GNSS, com os dados provenientes de

estações de monitoramento terrestre. Essa validação visa avaliar a confiabilidade dos dados de RO-GNSS no monitoramento da ionosfera. Além disso, busca-se explorar uma aplicação prática dos dados validados por meio da construção de mapas dinâmicos, capazes de representar espacial e temporalmente os padrões de cintilação ionosférica no período de estudo.

A estrutura deste trabalho está organizada em 4 seções. A presente seção apresenta a introdução para a compreensão dos temas tratados. Já a segunda seção descreve os materiais e métodos utilizados. Em 2.1 e 2.2 são abordadas as fontes de dados empregadas, enquanto em 2.3 é descrito o processamento computacional realizado. Na terceira seção estão apresentados os resultados obtidos e, por fim, a última parte do trabalho traz as conclusões.

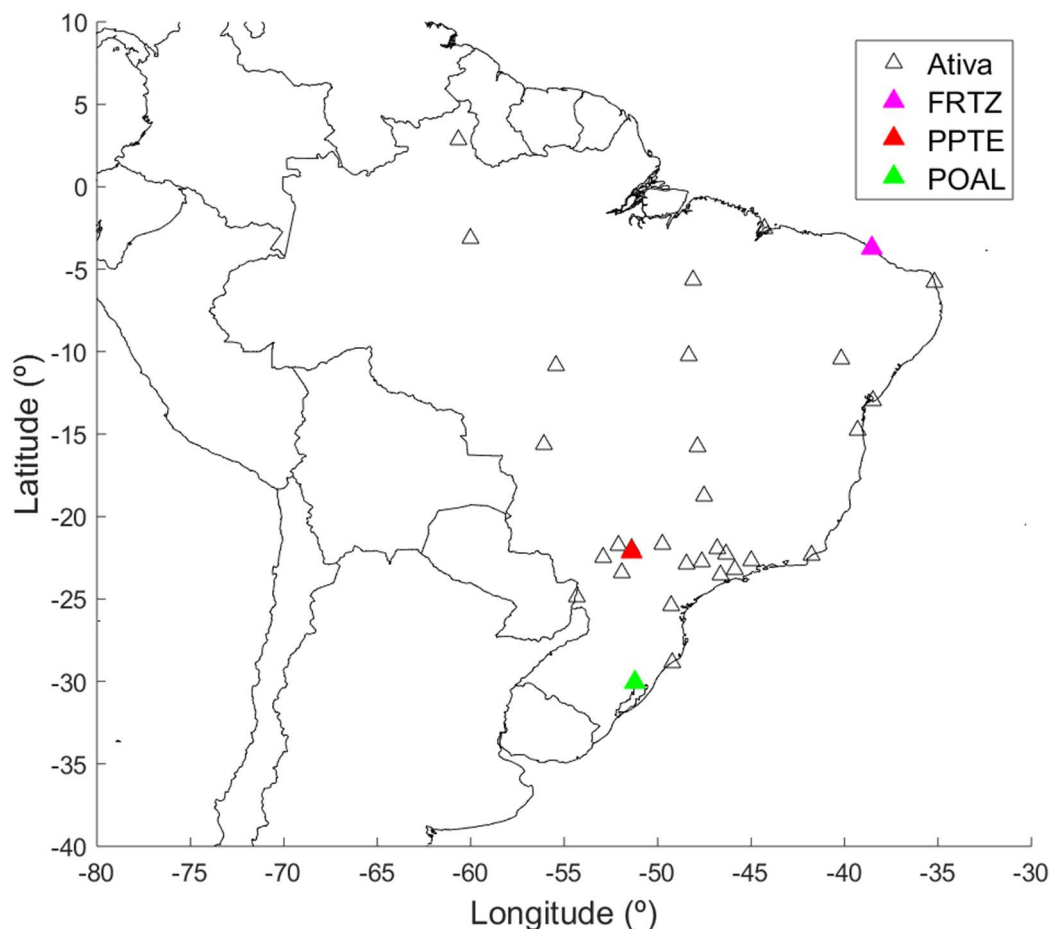
2 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizados dados provenientes da COSMIC-1 e de estações de monitoramento terrestre. Em um primeiro momento são apresentadas ambas as fontes de observação para, em seguida, serem exploradas suas formas de validação e visualização.

2.1 Dados de estações de monitoramento terrestre

Os dados das estações terrestres foram obtidos da rede GNSS NavAer por meio da ferramenta ISMR Query Tool (<https://ismrquerytool.fct.unesp.br/is/ismrtool/view/View.php>), um *software web* que permite a consulta e visualização de informações ionosféricas. As observações disponibilizadas podem ser obtidas em arquivos de texto (Vani et al., 2017; Monico et al., 2022; De Paula et al., 2023). A Figura 2 apresenta todas as estações ativas em território brasileiro até a data de 31 de março de 2026.

Figura 2 – Estações de monitoramento terrestre brasileiras ativas, com destaque para as utilizadas neste trabalho.

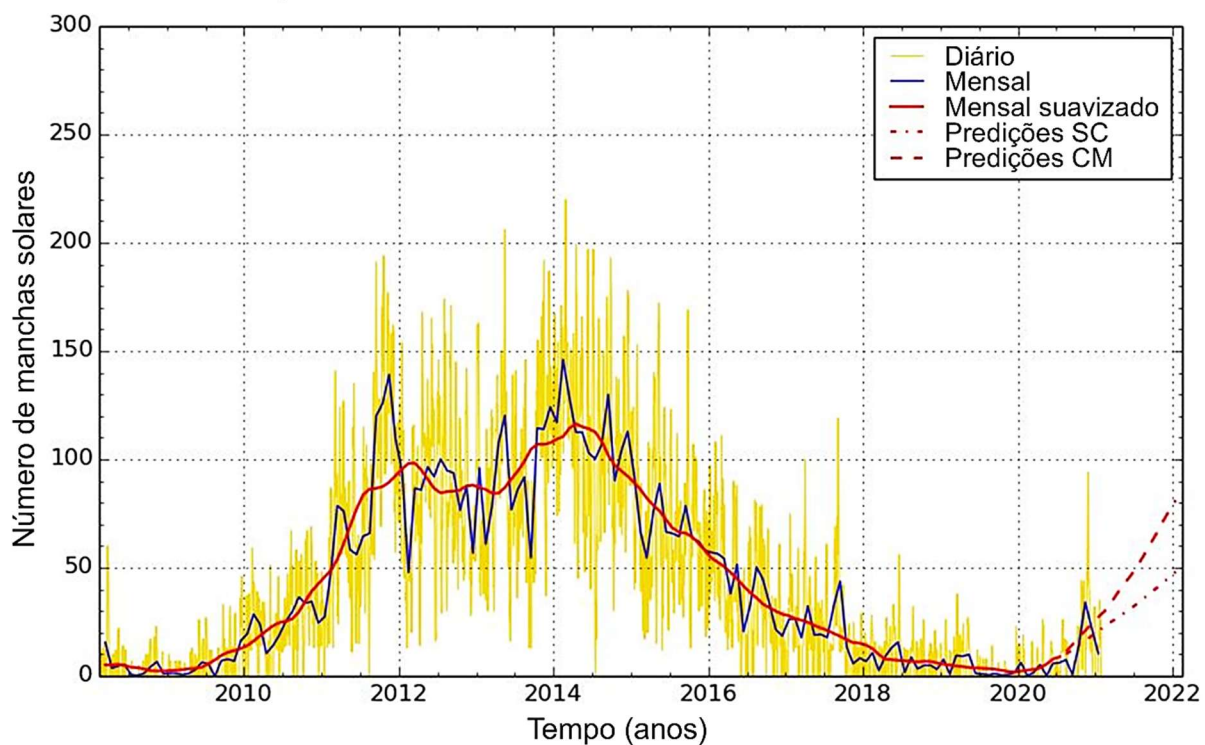


Fonte: Vani et al. (2017); Monico et al. (2022); De Paula et al. (2023).

A geometria de observação dessas estações é caracterizada por uma linha de visada direta entre o receptor em solo e os satélites GNSS. Os sinais recebidos apresentam trajetória predominantemente oblíqua ou vertical, atravessando a atmosfera em uma região relativamente acima da estação (Kintner; Ledvina; Humphreys, 2007). Essas características garantem às estações a capacidade de monitoramento contínuo e de alta resolução temporal em uma localização fixa (Misra; Ganga-Jamuna, 2002). Para a validação da RO-GNSS, foram utilizados dados de três estações, FRTZ, PRU2 e POAL, localizadas em Fortaleza - CE ($03^{\circ}44'40,39''$ S, $38^{\circ}34'39,48''$ W), Presidente Prudente - SP ($22^{\circ}07'19,34''$ S, $51^{\circ}24'25,49''$ W) e Porto Alegre - RS ($30^{\circ}04'26,03''$ S, $51^{\circ}07'10,86''$ W), respectivamente, as quais se encontram destacadas na Figura 2. Estas estações são equipadas com receptores Septentrio PolaRxS, configurados com uma taxa amostral de 50 Hz, gerando o índice S4 a cada 60 segundos (Vani et al., 2019). A seleção dessas estações visou analisar a variação geográfica, visto que FRTZ está localizada na região equatorial, que concentra alta densidade de elétrons, PRU2 em uma região intermediária, e POAL em região de latitudes médias, relativamente livre das anomalias ionosféricas (McNamara, 1991; Seeber, 2003).

Foram utilizados dados referentes ao ano de 2014, devido à sua proximidade com o pico de atividade solar registrado nesse período (Figura 3). Deste ano foram analisados os meses completos de março e julho, que correspondem, respectivamente, ao equinócio de outono e ao solstício de inverno, representando intervalos de maior e menor atividade ionosférica (McNamara, 1991; NOAA/SWPC, 2018; SIDC, 2026). Não houve restrição quanto ao horário de ocorrência dos dados observados, utilizou-se todo o período de 24 horas para cada dia do conjunto amostral.

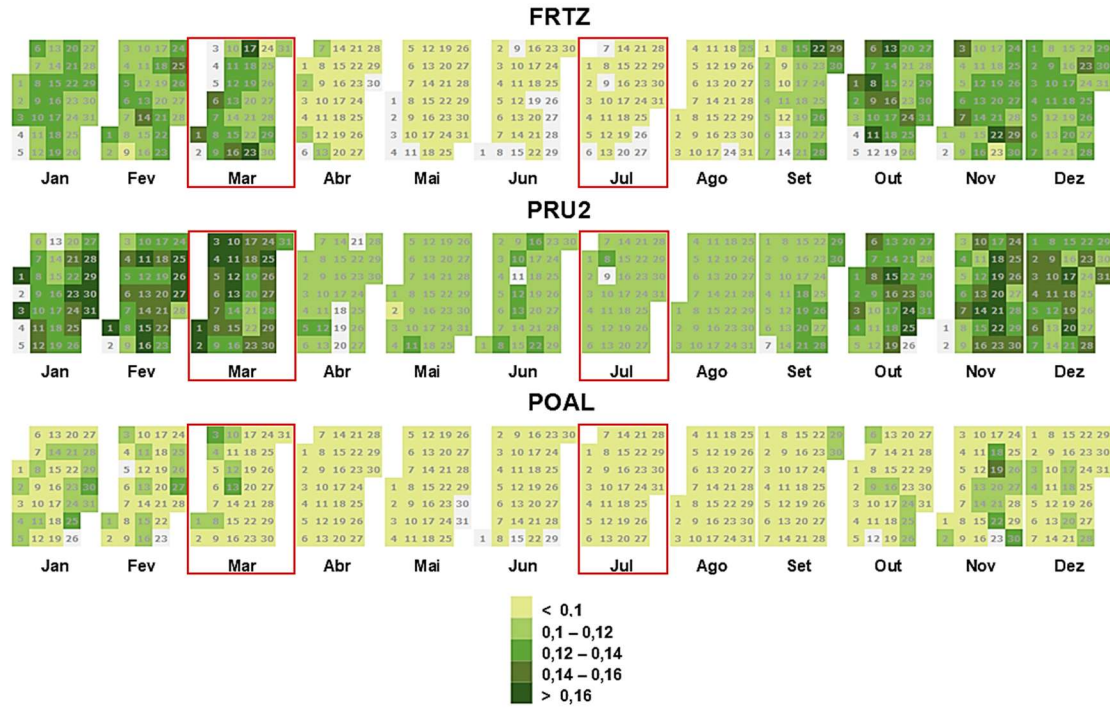
Figura 3 – Variação do número de manchas solares de 2008 a 2022.



Fonte: SIDC (2026).

A Figura 4 apresenta o calendário com a média diária do índice S4, considerando apenas dados GPS (*Global Positioning System*) de frequência L1, para as estações FRTZ, PRU2 e POAL, respectivamente. Por meio da representação é possível verificar que os meses selecionados apresentam valores compatíveis com o comportamento esperado da cintilação ionosférica. Observa-se uma variabilidade ao longo do ano, associada aos fatores sazonais e à atividade solar, com períodos de maior intensidade concentrados, principalmente em épocas próximas aos equinócios. Dessa forma, a escolha dos meses de análise buscou contemplar diferentes condições ionosféricas.

Figura 4 – Calendário de 2014 com valores de S4 médio para as estações FRTZ, PRU2 e POAL.



Fonte: Vani et al. (2017); Monico et al. (2022); De Paula et al. (2023).

As cintilações de amplitude sofridas pelos sinais GNSS, quando medidas por meio do índice S4, devem ser obtidas com base no desvio-padrão normalizado da intensidade do sinal, sendo esta intensidade estimada a partir de medidas realizadas em altas taxas de frequência em um período de um minuto (Conker et al., 2003; Datta-Barua et al., 2003; Vani, 2018). A Eq. (1) apresenta esse cálculo (Datta-Barua et al., 2003; Kintner; Ledvina, 2005):

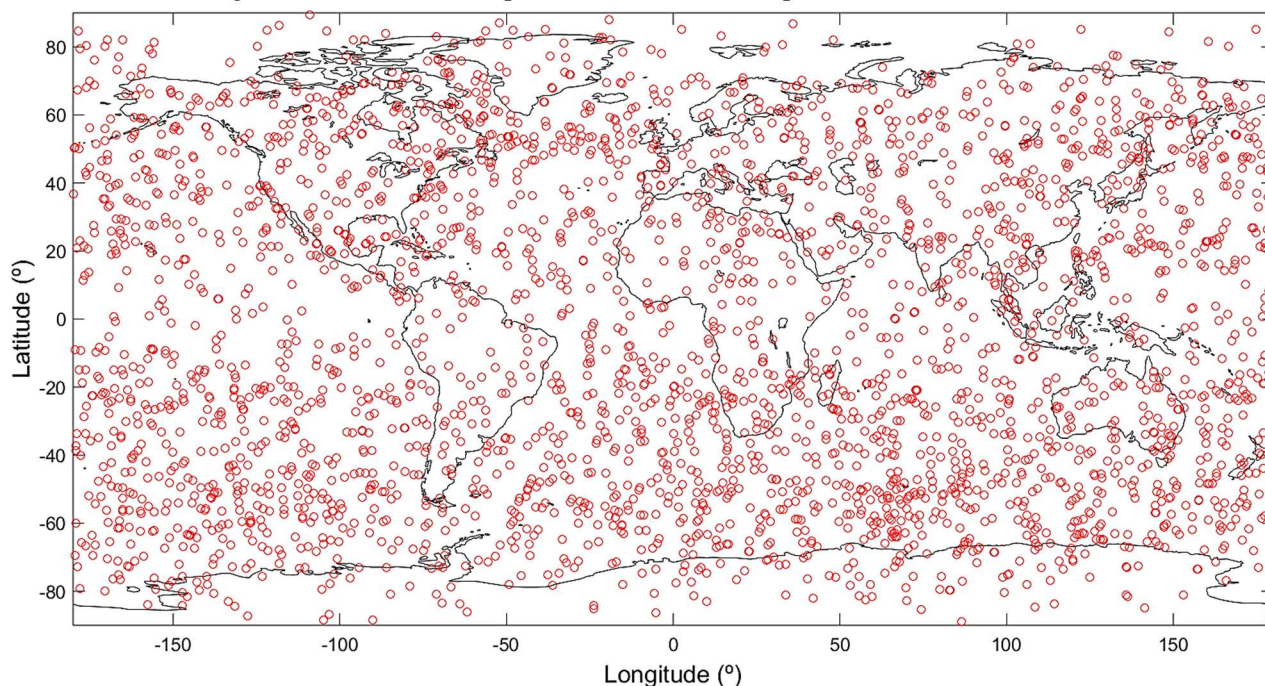
$$S4 = \sqrt{\frac{\langle SI^2 \rangle - \langle SI \rangle^2}{\langle SI \rangle^2}}, \quad (1)$$

em que S4 quantifica o índice S4 total, usando a relação sinal ruído (SNR), SI representa a intensidade do sinal amostrada a uma alta taxa (50 Hz), $\langle SI \rangle$ indica a operação de valor esperado ou média dos valores observados no período de um minuto e $\langle SI^2 \rangle$ é o valor médio da amplitude ao quadrado no mesmo intervalo. Vale destacar que o S4 total abrange os ruídos do ambiente, caso as observações ruidosas não sejam removidas, o valor de S4 deve apresentar um acréscimo. Para mais informações sobre esse acréscimo deve ser consultado Pereira (2018). No contexto da RO-GNSS, o cálculo do S4 é realizado com as médias dos valores observados considerando-se o período de um segundo (Syndergaard, 2024).

2.2 Dados de rádio ocultação

Quanto à técnica de RO-GNSS, foram empregados os arquivos *scnLv1*, os quais apresentam dados de índice S4 em função do tempo, bem como a localização geográfica da ocultação. Os dados associados ao valor de S4 são representados pelos parâmetros *alttp S4max*, *lcttp S4max*, *lattp S4max* e *lontp S4max*, que correspondem, respectivamente, à altitude, ao tempo local, à latitude e à longitude do ponto de tangência quando o valor máximo de S4 é observado. Estes dados são provenientes da missão COSMIC-1 e correspondem a sinais apenas GPS. Podem ser obtidos na página do CDAAC em sua seção de downloads (<https://cdaac-www.cosmic.ucar.edu/cdaac/tar/rest.html>) em formato NetCDF (*Network Common Data Form*). O motivo da escolha desta missão como fonte de perfis de ocultação se deve ao grande volume de dados disponibilizados ao longo de sua história, o que deve auxiliar na geração de resultados representativos (CDAAC, 2026). A Figura 5 apresenta a localização espacial dos perfis de S4 obtidos para o primeiro de março de 2014, evidenciando a distribuição geográfica das observações utilizadas.

Figura 5 – Localização dos perfis de índice S4 no dia primeiro de março de 2014.



Fonte: Os Autores (2026).

A COSMIC-1 consistiu em uma constelação composta por seis microsatélites lançados em 2006 em uma órbita de aproximadamente 800 km de altitude e inclinação de 72° (Anthes et al., 2008). Encerrada em 2020, sua configuração orbital garantia cobertura global, gerando entre 1500 e 2500 perfis de ocultação por dia em sua concepção inicial. Para o estudo da ionosfera, as medições foram registradas a uma taxa de 50 Hz, o que garantia alta resolução vertical, na ordem de poucos quilômetros, a depender da geometria da ocultação (Rocken et al., 2000).

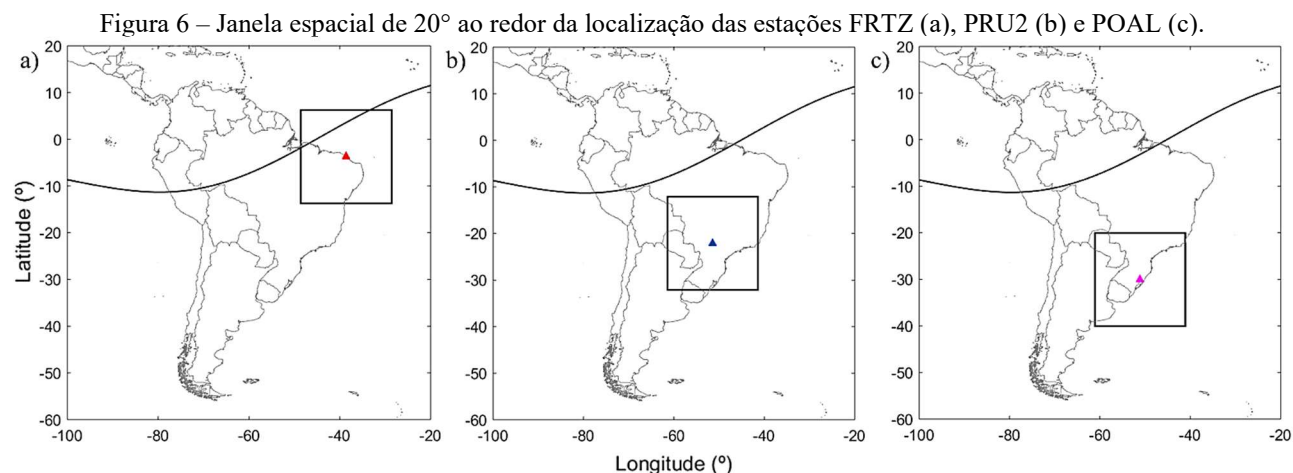
2.3 Processamento dos dados

Todo o processamento computacional foi realizado utilizando o *software MATLAB*. Inicialmente, foram desenvolvidas funções para a leitura dos dados e aplicada uma filtragem preliminar para ambas as técnicas. Essa filtragem consistiu na aplicação de uma máscara de elevação de 15°, adotada para mitigar os efeitos de multicaminho, atenuação atmosférica e cintilação, mais pronunciados perto do horizonte (Monico, 2008; Wang et al., 2022). É importante salientar que não foi aplicado nenhum tratamento específico para a remoção de ruídos neste estudo com o objetivo de preservar a integridade das observações e evitar a introdução de critérios arbitrários na análise. A presença desses dados e outras fontes de erro ainda é um desafio para a técnica. A ausência de uma filtragem mais robusta pode impactar as métricas de compatibilidade com as estações terrestres, resultando em discrepâncias mais elevadas.

Para a etapa de validação, os valores do índice S4 obtidos por meio da técnica de rádio ocultação foram comparados com os valores medidos por estações terrestres pertencentes à rede terrestre, neste trabalho consideradas como referência. Para garantir correspondência espacial e temporal adequada entre os dados, foram selecionadas apenas as ocultações que ocorreram dentro de uma janela espacial de 20° (latitude × longitude) em torno das estações (Figura 6), e em um intervalo de até 1 hora. A janela espacial para FRTZ se configurou da latitude -06,26° a 13,74° e longitude de -28,58° a -48,58°, para a PRU2 a área cobriu as latitudes de -32,12° a -12,12° e as longitudes de -61,41° a -41,41° e, para POAL, a janela correspondeu entre -40,07° a -20,07° em latitude e -61,12° a -41,12° em longitude. O intervalo de horário considerado para a utilização dos dados foi de 24 horas, abrangendo todo o ciclo diário, tendo somente a constelação GPS e sua frequência L1 utilizada para a análise dos eventos de cintilação. A seleção de ambas as janelas, temporal e espacial, foi realizada de forma empírica. Foram selecionados os valores de 20 em latitude e longitude, para a janela espacial, e de 1 hora, para a janela temporal, a partir de testes para verificação da quantidade de ocultações ocorridas. Os valores são compatíveis com o que foi adotado em trabalhos anteriores como Jerez (2019) e

Chen et al. (2021).

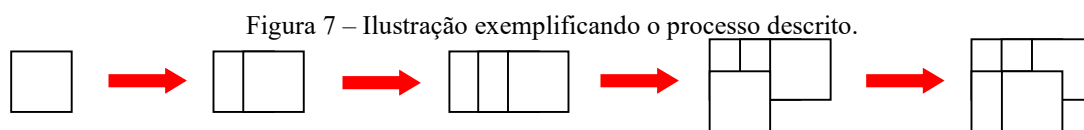
A comparação foi quantificada utilizando o RMSE (*Root Mean Squared Error*) e o erro relativo. O RMSE foi utilizado para quantificar a magnitude global das diferenças entre as duas técnicas, uma vez que fornece uma medida de dispersão dos erros. Adicionalmente, foi calculado o erro relativo a fim de avaliar a magnitude do erro em proporção aos valores observados, possibilitando uma comparação normalizada. Literaturas como as de Wilks (2006) e Jolliffe; Stephenson (2011) mostram o uso de métricas no estudo de observações atmosféricas.



Fonte: Os Autores (2026).

Adicionalmente, buscou-se apresentar uma aplicação prática dos dados de RO-GNSS por meio de uma visualização em escala global, com o objetivo de analisar a variação do índice S4 ao longo do ciclo diurno. Considerando a quantidade de observações de RO-GNSS para a região equatorial, optou-se por agrupar os dados em intervalos de uma hora, de acordo com o horário de ocorrência das ocultações, utilizando a média mensal como forma de garantir representatividade a nível global. Dessa forma, cada mês foi dividido em 24 intervalos de uma hora.

Posteriormente, foi realizado um trabalho de sobreamostragem dos dados para a obtenção de um mapa dinâmico. Este processo se inicia com a criação de uma janela de amplitude de 10° de longitude por 10° de latitude que se desloca de 5 em 5° ao longo dos paralelos e meridianos até que todo o globo seja percorrido. A Figura 7 exemplifica o processo descrito.



Fonte: Os Autores (2026).

Ao longo desse processo, foi calculada inicialmente a média de cada perfil, ou seja, a média entre os valores presentes em cada perfil. Em seguida, foi calculada a média dos valores resultantes deste processo, de modo que, ao final, cada janela apresentasse um único valor. Este procedimento é formalizado pela Eq. (2):

$$\overline{S4} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n S4_{i,j} \right) \quad (2)$$

em que $S4_{i,j}$ representam os valores de S4 de cada perfil, n é a quantidade desses valores dentro de um mesmo perfil e m é a quantidade de perfis delimitados nas janelas estabelecidas. Cada valor gerado no processo foi armazenado em uma matriz, que ao ser plotada como imagem, seus valores foram associados a uma coloração diferente. Os valores limítrofes selecionados foram 0 e 0.3, os quais se deram de maneira empírica e também com base em trabalhos desenvolvidos que empregaram o S4 proveniente de RO-GNSS, como em Chen et al.

(2021) e Wu (2020).

3 RESULTADOS

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados obtidos na comparação do índice S4 proveniente de RO-GNSS e de estações de monitoramento terrestre, bem como a aplicação desse tipo de dado na geração de mapas globais. A análise tem como foco o ano de 2014, correspondente a um período de pico do ciclo solar 24, proporcionando analisar o comportamento ionosférico em um cenário de alta atividade (NOAA/SWPC, 2018; SIDC, 2026).

Em relação aos resultados obtidos por meio da comparação entre as duas técnicas trabalhadas, a Tabela 1 apresenta a quantidade de dados explorados, tanto para os arquivos *scnLv1* da missão COSMIC-1, quanto para as estações terrestres.

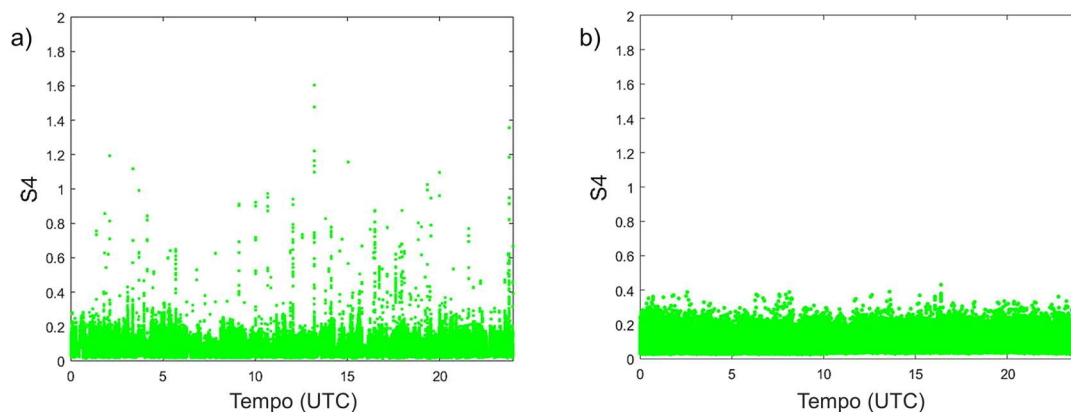
Tabela 1 – Quantidade de dados explorados para a viabilização do estudo.

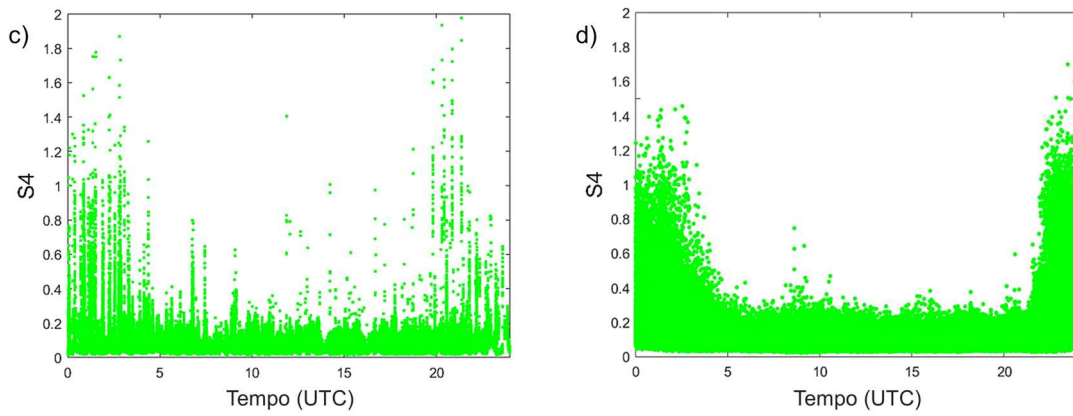
Período	Região da estação FRTZ	Região da estação PRU2	Região da estação POAL
Rádio ocultação			
Março	379262	535011	564772
Julho	476798	532698	549259
Estações terrestres			
Março	260781	320275	325140
Julho	238299	301129	288608

Fonte: Os Autores (2026).

Observa-se, por meio da Tabela 1, que a RO-GNSS apresenta um volume de dados superior ao das estações terrestres em todas as regiões e meses analisados. Esse destaque é relevante, pois evidencia uma vantagem interessante no estudo da ionosfera terrestre, especialmente em regiões onde a densidade de estações terrestres é limitada ou inexistente, possibilitando uma análise com maior abrangência geográfica. Nas regiões de PRU2 e POAL, por exemplo, foram registrados mais de 500 mil dados de RO-GNSS em ambos os períodos, em contraste com cerca de 300 mil observações obtidas pelas estações em solo. Tal fato reforça a capacidade da RO-GNSS em sua amostragem espacial e capacidade para estudos ionosféricos. Essa característica faz da técnica uma ferramenta interessante para complementar e validar observações obtidas por redes terrestres, especialmente em regiões onde a infraestrutura é limitada ou inexistente (Ludwig-Barbosa et al., 2020). Porém, é importante destacar que essa comparação se refere apenas ao número absoluto de observações. No caso da RO-GNSS, as medições correspondem ao conjunto de receptores a bordo de múltiplos satélites, como os seis satélites da constelação COSMIC-1, enquanto as observações das estações terrestres são obtidas de forma contínua por um único receptor fixo em solo. Em seguida, por meio das Figuras 8 a 10, são apresentados os resultados da análise temporal do índice S4 para cada região e período estudados.

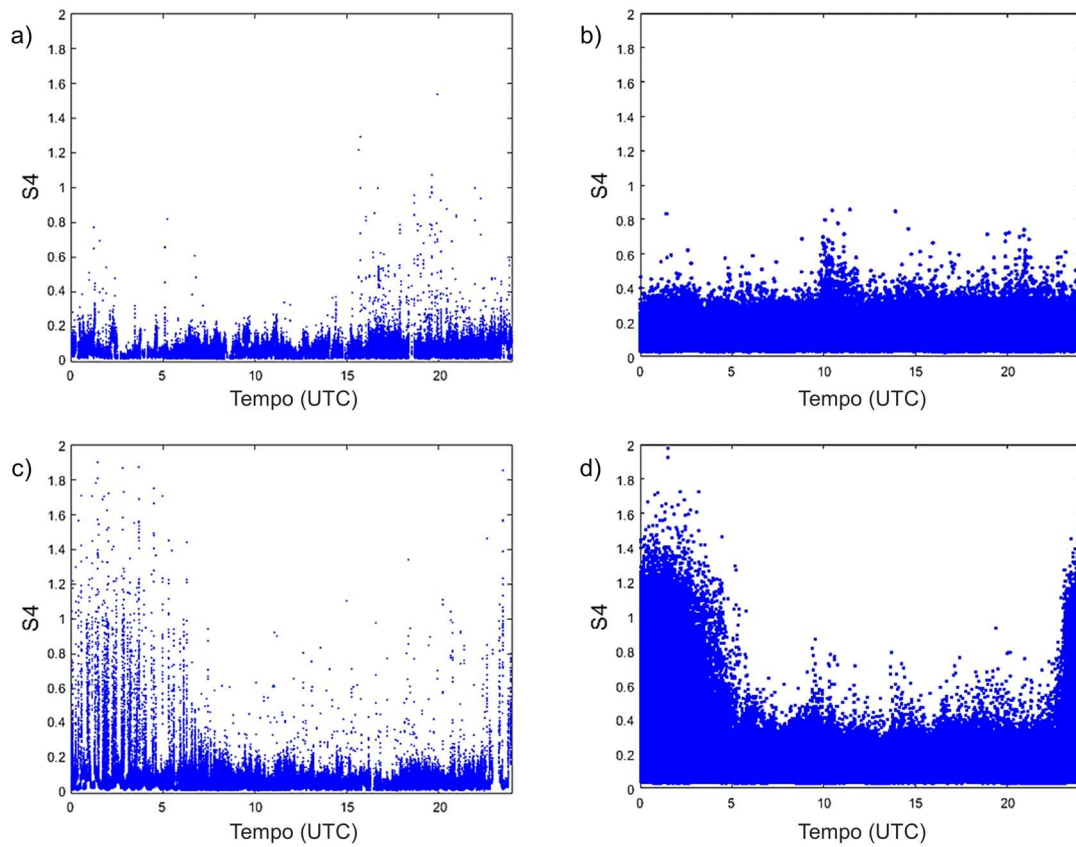
Figura 8 – Índice S4 por meio do arquivo *scnLv1* em julho (a) e março (c) de 2014 e da estação FRTZ em julho (b) e março (d) de 2014.





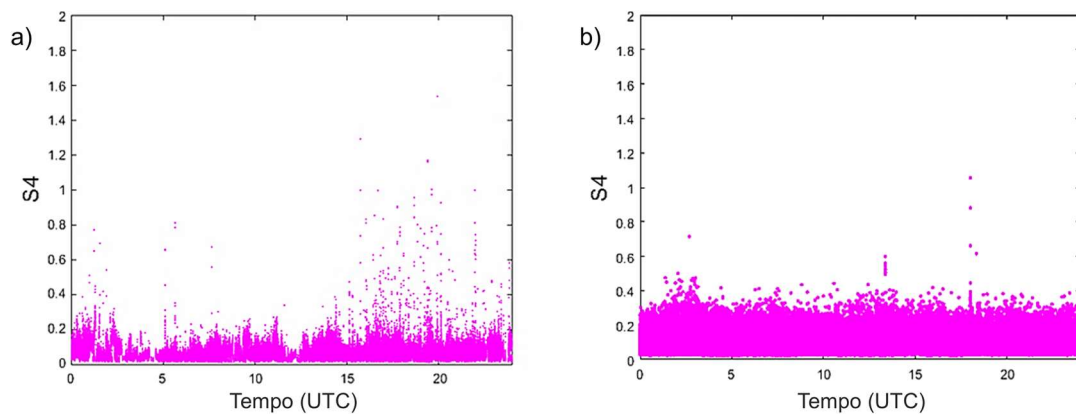
Fonte: Os Autores (2026).

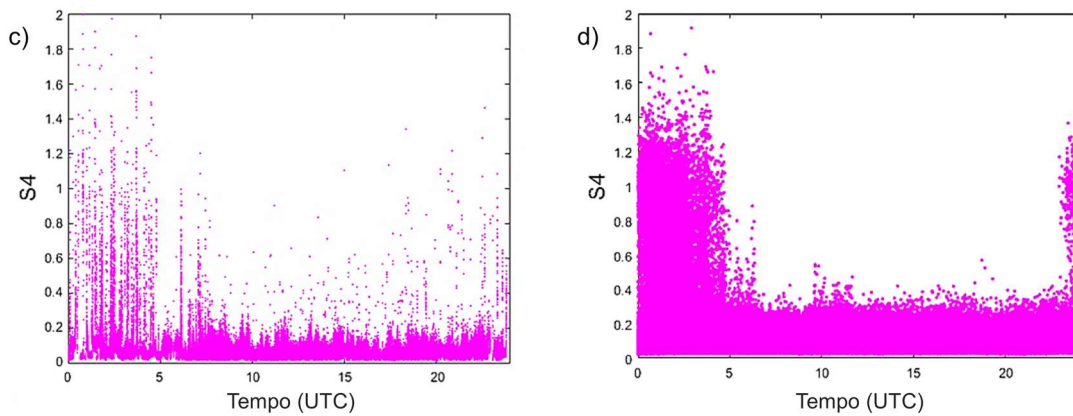
Figura 9 – Índice S4 por meio do arquivo scnLv1 em julho (a) e março (c) de 2014 e da estação PRU2 em julho (b) e março (d) de 2014.



Fonte: Os Autores (2026).

Figura 10 – Índice S4 por meio do arquivo scnLv1 em julho (a) e março (c) de 2014 e da estação POAL em julho (b) e março (d) de 2014.





Fonte: Os Autores (2026).

As Figuras 8 a 10 apresentam os valores do índice S4 obtidos por meio da técnica de RO-GNSS (a e c) e das estações da rede terrestre (b e d), para as regiões das estações FRTZ, PRU2 e POAL, nos meses de julho e março de 2014. Em todas as regiões e períodos, a quantidade de dados obtida foi suficiente para cobrir todo o ciclo diário, com registros distribuídos ao longo das 24 horas. Essa característica evidencia novamente um ponto positivo da RO.

De maneira geral, é possível observar semelhança no comportamento das duas técnicas. Em todas as regiões analisadas, no mês de julho se observa, em ambas, a presença de dados dispersos com maior amplitude. Tais variações não foram interpretadas, neste estudo, como eventos de cintilação propriamente ditos, mas sim como possíveis contribuições de ruído nas observações.

A presença de maior dispersão neste período pode ser dada pela menor atividade ionosférica nesse mês na região brasileira, o que resulta em valores de S4 mais baixos, tornando o ruído de fundo mais evidente (Macho et al., 2022). Por outro lado, estudos conduzidos por Arras; Wickert (2018) e Wu (2020) demonstram que a camada Esporádica E (Es) da ionosfera possui gradientes de densidade eletrônica extremamente elevados, capazes de induzir flutuações significativas na amplitude do sinal GNSS. Essas flutuações são registradas no produto *scnLv1* como picos de S4, que muitas vezes ocorrem mesmo em períodos de baixa atividade na camada F, como o mês de julho na região brasileira. Portanto, a presença desses dados ruidosos pode não representar necessariamente uma falha instrumental, mas sim a assinatura física de irregularidades na baixa ionosfera, capturadas pela técnica devido ao seu longo caminho e propagação nesta camada (Zeng; Sokolovskiy, 2010).

Para o mês de março, período de maior atividade ionosférica nas regiões analisadas, os eventos de cintilação tendem a iniciar por volta das 22:00 UTC, ou 19:00 no horário local, após o pôr do sol, estendendo-se até as primeiras horas da madrugada (Macho et al., 2022; Sousasantos et al., 2018). Esse comportamento é fisicamente consistente com a formação das bolhas de plasma equatoriais, geradas pela instabilidade de Rayleigh-Taylor generalizada (Kelley, 2009; Abdu, 2016). A relação entre essa instabilidade e a ocorrência de bolhas de plasma equatoriais, incluindo sua relação com ciclos solares e variações sazonais foram recentemente investigadas por Vital et al. (2024). Isso reforça a consistência dos dados obtidos por RO-GNSS em relação aos dados de estações terrestres.

Com relação à variação geográfica, em ambas as técnicas os resultados não evidenciam um padrão claramente definido entre as regiões analisadas, o que sugere que a influência espacial no comportamento do índice S4 é modulada por fatores adicionais, como condições geomagnéticas e variabilidade sazonal da ionosfera. Em março na região de POAL, por exemplo, é possível observar valores de maior intensidade quando comparado com FRTZ. Este fato pode estar relacionado à variabilidade da latitude da crista da EIA em função de condições geomagnéticas sazonais, ou até mesmo à ocorrência de eventos de cintilação em latitudes médias. Estudos como o de Macho et al. (2022) mostram que a intensidade dos eventos ionosféricos pode apresentar variações regionais significativas dependendo das condições do ciclo solar e da estação do ano.

Assim, ao considerar os cenários estudados, observa-se que a RO-GNSS acompanha tanto as variações diurnas da ionosfera quanto as variações sazonais esperadas, apresentando resultados compatíveis com as

observações terrestres. De forma a quantificar essa compatibilidade, podem ser observadas na Tabela 2 as métricas de avaliação da RO-GNSS a partir da comparação do índice S4 com os dados de estações terrestres.

Tabela 2 – Métricas para a avaliação da RO.

Período	Região da estação FRTZ	Região da estação PRU2	Região da estação POAL
RMSE médio			
Julho	0,033	0,045	0,028
Março	0,056	0,066	0,035
Erro relativo médio (%)			
Julho	37,91	44,89	35,67
Março	45,05	46,65	39,32

Fonte: Os Autores (2026).

Observa-se a partir da Tabela 2 que, para as três regiões analisadas, os valores de RMSE médio e erro relativo médio são mais elevados no mês de março em comparação com julho. Esse comportamento é esperado e está associado à influência sazonal da ionosfera, visto que o mês de março está associado a um período de maior variabilidade ionosférica (Macho et al., 2022; Sousasantos et al., 2018). A maior intensidade das irregularidades em março aumenta a discrepância entre as medições pontuais obtidas pelas duas técnicas. Além disso, destaca-se que a região da estação POAL, situada nas latitudes médias da ionosfera, apresenta os menores valores de RMSE e erro relativo, tanto em julho quanto em março. Tal fato está relacionado com a influência da latitude geográfica nesta camada da atmosfera. Regiões equatoriais, como as de FRTZ e PRU2, sofrem com maior intensidade da atividade ionosférica e, assim, uma maior discrepância entre as técnicas pode ser observada.

Com relação à magnitude dos valores encontrados, os erros relativos médios, que variam de 35,67 a 46,65%, estão dentro da ordem de grandeza esperada para comparações envolvendo dados de RO-GNSS. Ludwig-Barbosa et al. (2020) e Prol et al. (2023) não realizam comparações ponto a ponto diretas, mas indicam diferenças significativas entre RO-GNSS e fontes suplementares. Embora em Garcia-Fernandez et al. (2003) tenham citado uma magnitude de erro entre 10 a 20% no desempenho da recuperação de perfis ionosféricos de RO-GNSS, estudos mais recentes mostraram que a complexidade das irregularidades ionosféricas, especialmente em períodos e regiões de alta atividade, como é o caso deste trabalho, podem levar a maiores discrepâncias (Chen et al., 2021; Wu, 2020). Valores dessa magnitude podem ser explicados pelas distintas geometrias de observação. Enquanto estações terrestres oferecem medidas ao longo de uma trajetória relativamente vertical, a RO-GNSS observa a atmosfera ao longo de um caminho que atravessa horizontalmente grandes extensões (Kursinski, 1997). Essa diferença significa que a técnica interage com a ionosfera em um volume maior e em diferentes altitudes, fazendo com que suas observações representem uma média espacial, enquanto estações terrestres captam comportamentos mais pontuais (Syndergaard, 2000). Consequentemente, a comparação direta entre ambas as técnicas deve levar em consideração essa distinção fundamental. Adicionalmente, Tang et al. (2023) reforçam que a concordância entre os índices S4 de RO-GNSS e observações terrestres é fortemente dependente de limiares de detecção, em que o uso de critérios rígidos pode resultar em subestimações e, consequentemente, em maiores resíduos nas comparações.

Quanto à forma de visualização dos dados de RO-GNSS em escala global, foi possível a criação de plotagens que permitissem a visualização do comportamento do índice S4. A Tabela 3 mostra a quantidade de ocultações exploradas para a geração dos resultados.

Tabela 3 – Quantidade de ocultações nos meses selecionados para o estudo do S4 em mapas dinâmicos.

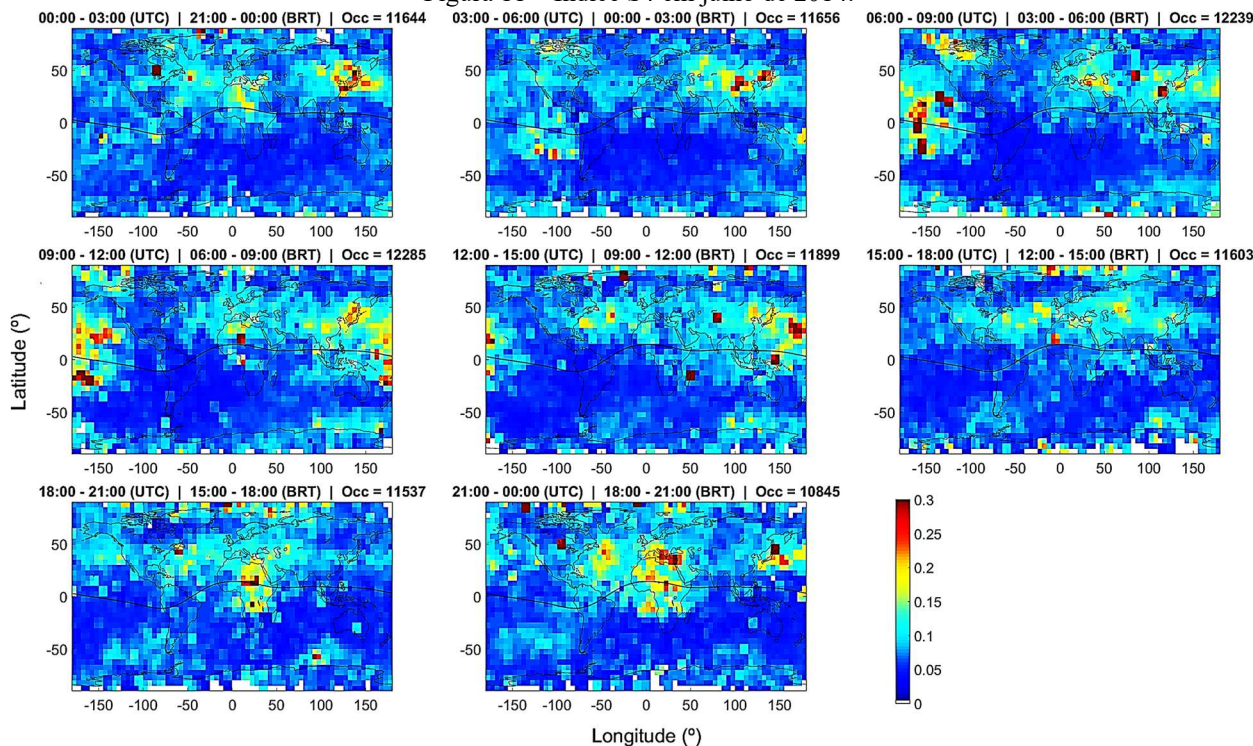
Período	Número de ocultações
Março	91950
Julho	93708

Fonte: Os Autores (2026).

Ao todo, foi possível gerar 48 imagens, 24 para cada período analisado. De maneira a evitar uma extensa apresentação de resultados, os resultados foram resumidos e apresentados nas Figuras 11 e 12. Nestas figuras as imagens foram agrupadas em períodos de 3 horas e nelas estão informados o horário de ocorrência

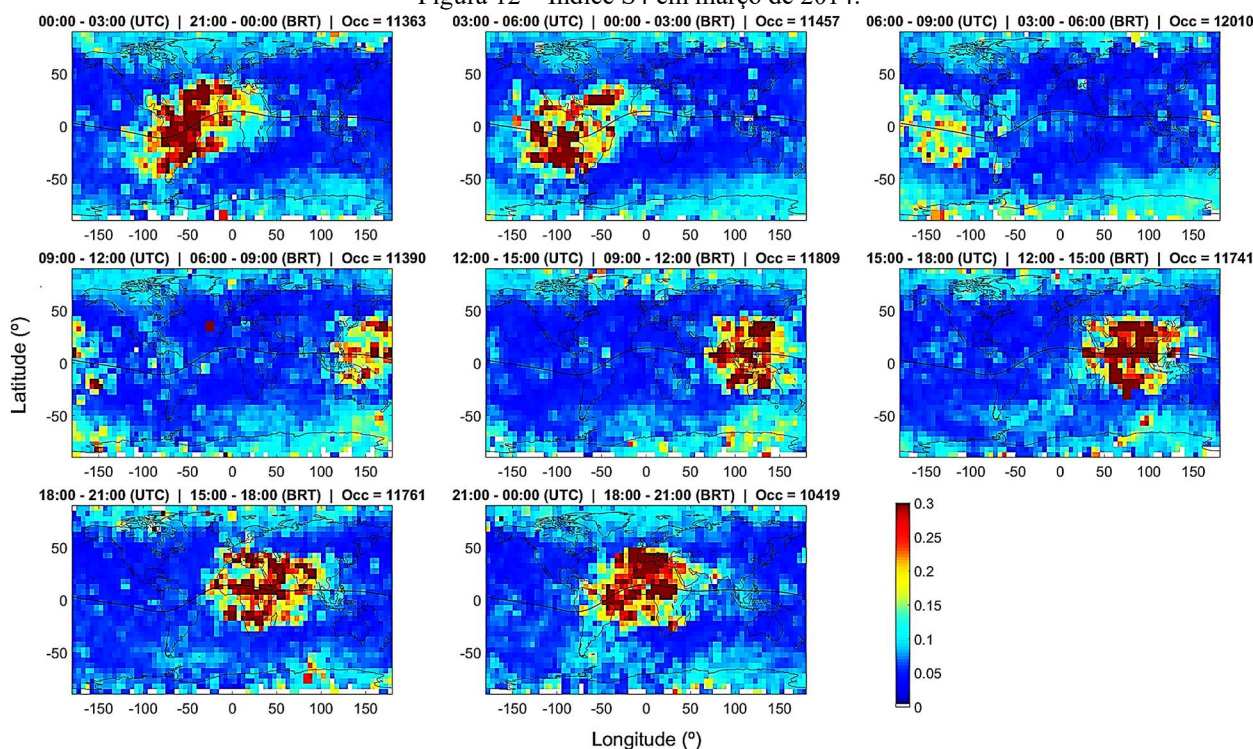
dos dados, tanto em BRT (*Brasília Time*) quanto em UTC, e a quantidade de ocultações empregadas.

Figura 11 – Índice S4 em julho de 2014.



Fonte: Os Autores (2026).

Figura 12 – Índice S4 em março de 2014.



Fonte: Os Autores (2026).

Analisando a Figura 11, a qual apresenta dados referentes ao mês de julho, verifica-se que quantidades superiores a 10 mil ocultações foram suficientes para garantir cobertura quase total do globo. Por se tratar de um período de menor atividade da camada ionizada no Hemisfério Sul, a região do território brasileiro, por exemplo, não apresenta a ocorrência de cintilações. Já em algumas áreas do hemisfério Norte verifica-se que as irregularidades ionosféricas se mostram mais intensas e espacialmente distribuídas.

A análise comparativa entre as Figuras 11 e 12 revela a forte dependência sazonal das irregularidades ionosféricas no setor brasileiro. Em julho, observa-se uma ionosfera globalmente mais estável, com baixos índices de cintilação sobre o Brasil. Fisicamente, este comportamento é explicado pela configuração da EIA e pela redução do gradiente de densidade eletrônica no período após o pôr do sol, o que inibe o crescimento da instabilidade de Rayleigh-Taylor (Abdu, 2016). Em contraste, a Figura 12 evidencia uma intensa atividade de cintilação concentrada sobre o território brasileiro e regiões adjacentes, sendo possível visualizar bolhas de plasma que se estendem latitudinalmente ao longo das cristas da EIA.

A capacidade de identificar essas regiões fortemente afetadas por meio de receptores embarcados em satélites LEO demonstra a eficácia da técnica de RO-GNSS em fornecer uma visão global que complementa as redes terrestres. Conforme observado, o deslocamento das irregularidades de oeste para leste acompanha a rotação terrestre e a dinâmica do plasma no Equador Geomagnético, corroborando com os trabalhos de Carmo et al. (2023) e Macho et al. (2022) para o setor sul-americano. Esta dinâmica reforça que a RO-GNSS não apenas detecta a presença de cintilação, como também captura a morfologia latitudinal das irregularidades, essencial para o monitoramento do clima espacial em escala global.

4 CONCLUSÕES

No presente trabalho foi desenvolvido um estudo a respeito do índice S4 obtido a partir da técnica de RO-GNSS. Dessa forma, realizou-se inicialmente uma forma de avaliação a partir de estações terrestres de monitoramento, com a qual foi possível constatar que ambas as técnicas apresentaram comportamento compatível nos períodos e regiões estudadas. Embora a presença de informações ruidosas fosse marcante nas plotagens com os arquivos scnLv1, ainda foi possível distinguir das cintilações ocorridas, as quais se apresentavam em horários específicos e em maior volume. Logo, esta primeira parte do estudo indicou que índices de S4 disponibilizados por meio da técnica de RO-GNSS têm potencial para estudos e aplicações práticas.

A análise aprofundada revelou que a técnica de RO-GNSS apresenta como principal vantagem a capacidade de fornecer cobertura global, incluindo regiões remotas onde a instalação de estações terrestres é limitada ou inviável. Dessa forma, a RO-GNSS atua como uma importante fonte complementar de dados em relação às técnicas baseadas em observações terrestres, contribuindo para uma melhor representação e monitoramento espacial dos fenômenos atmosféricos (Ludwig-Barbosa et al., 2020).

Apesar da compatibilidade geral, as diferenças observadas no erro relativo médio, oscilando entre 35,67 e 46,65%, indicam a necessidade de uma análise mais aprofundada sobre as causas dessas discrepâncias. Fatores como a resolução espacial e temporal distintas das duas técnicas, a propagação dos sinais por meio de diferentes volumes atmosféricos e a sensibilidade a diferentes escalas de irregularidades ionosféricas podem contribuir para essas variações. Futuros trabalhos devem focar na investigação destes aspectos, assim como na aplicação de técnicas de filtragem de ruído mais sofisticadas para os dados de RO-GNSS, o que deve contribuir para uma melhora nas comparações realizadas e permitir uma avaliação mais precisa sobre eventos de cintilação.

Sabendo-se do potencial dos dados da técnica de RO-GNSS, também foi apresentada uma aplicação prática, a qual consistiu na visualização da existência, magnitude e variação das cintilações ionosféricas ao longo do globo. Este estudo permitiu verificar a diferença de comportamento da ionosfera sobre os diferentes hemisférios a partir de dados de receptores embarcados em satélites LEO. Tal fato foi fortemente observado sobre a região do território brasileiro, que para os dias analisados mostrou uma enorme irregularidade concentrada sobre toda essa área. A missão sucessora da COSMIC-1, COSMIC-2, possui melhor cobertura da região equatorial e utiliza observações multi-GNSS, o que resulta em um aumento significativo na quantidade de dados disponíveis, especialmente para a região do Brasil. A missão se mostra promissora para aplicações futuras utilizando a abordagem proposta neste trabalho.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) (Processos

nº 2021/05285-0, 2022/00276-5 e 2023/15278-6), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES) Código de Financiamento 001 (Processos nº 88887.961778/2024-00 e 88887.239292/2025-00), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (Processo nº 151536/2025-2) e à Universidade Estadual Paulista (UNESP).

Contribuição dos Autores

Conceituação: R.S.N., G.O.J. e D.B.M.A.; obtenção dos dados e investigação inicial: R.S.N., G.O.J. e D.B.M.A.; metodologia: R.S.N., G.O.J. e D.B.M.A.; processamento de dados: R.S.N.; aquisição de financiamento: R.S.N., G.O.J. e D.B.M.A.; supervisão: G.O.J. e D.B.M.A.; redação – minuta inicial: R.S.N.; redação – revisão e edição: R.S.N., G.O.J. e D.B.M.A. Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

Conflitos de Interesse

Os autores declaram que não há conflitos de interesse.

Referências

- ABDU, M. A.; BATISTA, I. S.; CARRASCO, A. J.; & BRUM, C. G. M. (2005). South Atlantic magnetic anomaly ionization: A review and a new focus on electrodynamic effects in the equatorial ionosphere. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 67:1643- 1657. doi: 10.1016/j.jastp.2005.01.014.
- ABDU, M. A. (2016). Electrodynamics of ionospheric weather over low latitudes. *Geosci. Lett.* 3, 11. <https://doi.org/10.1186/s40562-016-0043-6>.
- AKALA, A. O.; DOHERTY, P. H.; CARRANO, C. S.; VALLADARES, C. E.; & GROVES, K. M. (2012). Impacts of ionospheric scintillations on GPS receivers intended for equatorial aviation applications. *Radio Science*. 47(4). doi: 10.1029/2012RS004995.
- AKALA, A. O.; EJALONIBU, A. H.; DOHERTY, P. H.; RADICELLA, S. M.; GROVES, K.; CARRANO, C. S.; BRIDGWOOD, C. T.; & STONEBACK, R. A. (2017). Characterization of GNSS Amplitude Scintillations over Addis Ababa during 2009–2013. *Advances in Space Research*. (59)8. doi: 10.1016/j.asr.2017.01.044.
- ANTHES, R. A.; BERNHARDT, P. A.; CHEN, Y.; CUCURULL, L.; DYMOND, K. F.; ECTOR, D.; HEALY, S. B.; HO, S.; HUNT, D. C.; KUO, Y.; LIU, H.; MANNING, K.; MCCORMICK, C.; MEEHAN, T. K.; RANDEL, W. J.; ROCKEN, C.; SCHREINER, W. S.; SOKOLOVSKIY, S. V.; SYNDERGAARD, S.; THOMPSON, D. C.; TRENBERTH, K. E.; WEE, T.; YEN, N. L.; ZENG, Z. (2008). The COSMIC/FORMOSAT-3 Mission: Early Results. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 89(3), 313-334. <https://doi.org/10.1175/BAMS-89-3-313>.
- ARAGON-ANGEL, A.; HERNANDEZ-PAJARES, M.; ZORNOZA, J. M. J.; & SUBIRANA, J. S. (2010). Improving the Abel transform inversion using bending angles from FORMOSAT3/COSMIC. *GPS Solutions*. v. 14 (1), 23-33.
- ARRAS, C.; & WICKERT, J. (2018). Estimation of ionospheric sporadic E intensities from GPS radio occultation measurements. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v. 171, p. 60-63.
- BURKE, W. J.; GENTILE, L. C.; HUANG, C. Y.; VALLADARES, C. E.; & SU, S. Y. (2004). Longitudinal variability of equatorial plasma bubbles observed by DMSP and ROCSAT-1. *Journal of Geophysical Research*. 109(A12301). doi:10.1029/2004JA010583.
- CARMO, C. S.; DAI, L.; DENARDINI, C. M.; FIGUEIREDO, C. A. O. B.; WRASSE, C. M.; RESENDE, L. C. A.; BARROS, D.; MORO, J.; CHEN, S. S.; PICANÇO, G. A. S.; SILVA, R. P.; WANG, C.; LI, H.; & LIU, Z. (2023). Equatorial plasma bubbles features over the Brazilian sector according to the solar cycle and geomagnetic activity level. *Front. Astron. Space Sci.* 10:1252511. doi: 10.3389/fspas.2023.1252511.

- CHEN, S.-P.; LIN, C. H.; RAJESH, P. K.; LIU, J.-Y.; EASTES, R.; CHOU, M.-Y.; & CHOI, J.-M. (2021). Near real-time global plasma irregularity monitoring by FORMOSAT-7/COSMIC-2. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 126, e2020JA028339. <https://doi.org/10.1029/2020JA028339>.
- CONKER, R. S.; EL-ARINI, M. B.; HEGARTY, C. J.; & HSIAO, T. (2003). Modeling the Effects of Ionospheric Scintillation on GPS/Satellite-Based Augmentation System Availability. *Radio Science*, Virginia, v. 38 (1): 1-23. <https://doi.org/10.1029/2000RS002604>.
- COSMIC DATA ANALISYS AND ARCHIVE CENTER (CDAAC). (2026). *General Documentation about CDAAC Data*. Disponível em: <https://cdaac-www.cosmic.ucar.edu/cdaac/doc/overview.html>. Acesso em: 31 mar. 2026.
- DATTA-BARUA, S.; DOHERTY, P.; DELAY, S.; DEHEL, T.; & KLOBUCHAR, J. A. (2003). *Ionospheric scintillation effects on single and dual frequency GPS positioning*. In: Proceedings of the ION GPS 2003. Portland (OR): [s.n.]. http://apollo.tbc.iit.edu/~spaceweather/live/pubs/conf/DattaBarua_IONGPS_2003.pdf.
- DE PAULA, E.; & MONICO, J. F. G. (2023). A Retrospective of Global Navigation Satellite System Ionospheric Irregularities Monitoring Networks in Brazil. *Journal of Aerospace Technology and Management*, v. 15. DOI: <https://doi.org/10.1590/jatm.v15.1288>.
- DE REZENDE, L. F. C.; DE PAULA, E. R.; KANTOR, I. J.; & KINTNER, P. M. (2007). Mapping and Survey of Plasma Bubbles over Brazilian Territory. *The Journal of Navigation*. 60:69- 81. doi: 10.1017/S0373463307004006.
- ELGERED, G.; & WICKERT, J. (2017). Monitoring of the Neutral Atmosphere. In: TEUNISSEN, P., MONTENBRUCK, O. (Eds). *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*. Springer, p. 1109-1138.
- GARCIA-FERNANDEZ, M.; HERNANDEZ-PAJARES, M.; JUAN, J. M.; & SANZ, J. (2005). Performance of the improved Abel transform to estimate electron density profiles from GPS occultation data. *GPS Solutions*.
- GHOBADI, H.; SPOGLI, L.; ALFONSI, L.; CESARONI, C.; CICONE, A.; LINTY, N.; ROMANO, V.; & CAFARO, M. (2020). Disentangling ionospheric refraction and diffraction effects in GNSS raw phase through fast iterative filtering technique. *GPS Solutions*. 24(3):1-13, doi: 10.1007/s10291-020-01001-1.
- GROVES, K. M.; RUGGIERO, F. H.; STARKS, M. J.; BEACH, T. L.; & STRAUSS, P. (2009). *Comparisons of Space-Based GPS Occultation Ionospheric Scintillation Measurements With Ground-Based VHF Measurements*. In: 11th International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF 2009, Salvador, Bahia. <https://library.seg.org/doi/epdf/10.1190/sbgf2009-035>.
- HAJJ, G. A.; KURSINSKI, E. R.; ROMANS, L. J.; BERTIGER, W. I.; & LEROY, S. S. (2002). A technical description of atmospheric sounding by GPS occultation. *Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics*, v. 64, n. 4, p. 451-469.
- HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; & WASLE, E. (2008). *GNSS – Global Navigation Satellite Systems GPS, GLONASS, Galileo, and more*. New York: Springer-Verlag.
- ISMR QUERY TOOL. (2026). *ISMR Query Tool*. Disponível em: <https://ismrquerytool.fct.unesp.br/is/index.php>. Acesso em: 31 mar. 2026.
- JEREZ, G. O.; ALVES, D. B. M.; NESPOLO, R. S.; MONICO, J. F. G.; & HERNÁNDEZ-PAJARES, M. (2022). Rádio Ocultação GNSS: Revisão Teórica, Missões e Produtos. *Revista Brasileira de Cartografia*, [S. l.], v. 74, n. 4, p. 943–967. <https://doi.org/10.14393/rbcv74n4-63973>.
- JOLLIFFE, I. T. & STEPHENSON, D. B. (2011). *Forecast Verification: A Practitioner's Guide in Atmospheric Science*. 2. ed, Chichester: John Wiley & Sons.
- KELLEY, M. C. (2009). *The Earth's ionosphere: plasma physics and electrodynamics*. Academic press.
- KINTNER, P. M.; LEDVINA, B. M.; & HUMPHREYS, T. E. (2007). GNSS and Ionospheric Scintillation. *Inside GNSS*, p. 22–30.
- KINTNER, P. M.; & LEDVINA, B. M. (2005). The ionosphere, radio navigation, and global navigation

- satellite systems. *Advances in Space Research*, v. 35, p. 788-811. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2004.12.076>.
- KURSINSKI, E. R. (1997). The GPS radio occultation concept: theoretical performance and initial results. (Tese de Doutorado) – California Institute of Technology, Pasadena.
- KURSINSKI, E. R.; HAJJ, G. A.; LEROY, S. S.; & HERMAN, B. (2000). The GPS Radio Occultation Technique. In: LEE, L.C.; ROCKEN, C.; & KURSINSKI, R. *Applications of Constellation: Observing System for Meteorology, Ionosphere & Climate*. Hong Kong: Springer-Verlag.
- KURSINSKI, E. R.; HAJJ, G. A.; SCHOFIELD, J. T.; LINFIELD, R. P.; & HARDY, K. R. (1997). Observing Earth's atmosphere with radio occultation measurements using the Global Positioning System. *J. Geophys. Res.*, 102(D19), 23429–23465, doi:10.1029/97JD01569.
- LI, G.; NING, B.; OTSUKA, Y.; ABDU, M. A.; ABADI, P.; LIU, Z.; SPOGLI, L.; & WAN, W. (2020). Challenges to Equatorial Plasma Bubble and Ionospheric Scintillation Short-Term Forecasting and Future Aspects in East and Southeast Asia. *Surveys in Geophysics*. 1- 38. doi: 10.1007/s10712-020-09613-5.
- LIU, J.-Y.; LIN, C.-H.; RAJESH, P. K.; LIN, C.-Y.; CHANG, F.-Y.; LEE, I.-T.; FANG, T.-W.; FULLERROWELL, D.; & CHEN, S.-P. (2022). Advances in Ionospheric Space Weather by Using FORMOSAT-7/COSMIC-2 GNSS Radio Occultations. *Atmosphere*, 13, 858. <https://doi.org/10.3390/atmos13060858>.
- LUDWIG-BARBOSA, V.; SIEVERT, T.; RASCH, J.; CARLSTRÖM, A.; PETTERSSON, M. I.; & VU, V. T. (2020). Evaluation of ionospheric scintillation in GNSS radio occultation measurements and simulations. *Radio Science*, 55, e2019RS006996. <https://doi.org/10.1029/2019RS006996>.
- MACHO, E. P.; CORREIA, E.; SPOGLI, L.; & MUELLA, M. T. A. H. (2022). Climatology of ionospheric amplitude scintillation on GNSS signals at south American sector during solar cycle 24. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v. 231. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2022.105872>.
- McNAMARA, L. F. (1991). *The ionosphere: communications, surveillance, and direction finding*. Florida: Krieger Publishing Company.
- MISRA, P.; & GANGA-JAMUNA, P. E. (2002). Global Positioning System: Signals, Measurements, and Performance. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, v. 17, p. 36-37.
- MONICO, J. F. G. (2008). *Posicionamento pelo GNSS: Fundamentos, Definição e Aplicação*. 2 ed. São Paulo: Editora UNESP.
- MONICO, J. F. G.; & SHIMABUKURO, M. H. (2022). The GNSS NavAer INCT Project Overview and Main Results. *Journal of Aerospace Technology and Management*, v. 14. DOI: <https://doi.org/10.1590/jatm.v14.1249>.
- MORAES, A. O.; COSTA, E.; DE PAULA, E. R.; PERRELLA, W. J.; & MONICO, J. F. G. (2014). Extended ionospheric amplitude scintillation model for GPS receivers, *Radio Sci.* 49:315–329. doi: 10.1002/2013RS005307.
- MUELLA, M. T. A. H.; DUARTE-SILVA, M. H.; MORAES, A. O.; DE PAULA, E. R.; DE REZENDE, L. F. C.; ALFONSI, L.; & AFFONSO, B. J. (2017). Climatology and modeling of ionospheric scintillations and irregularity zonal drifts at the equatorial anomaly crest region. *Annales Geophysicae*. 35:1201-1218. doi: 10.5194/angeo-35-1201-2017.
- NOAA/SWPC. (2018). *Solar Cycle 24 Status and Solar Cycle 25 Upcoming Forecast*. Disponível em: <https://www.swpc.noaa.gov/news/solar-cycle-24-status-and-solar-cycle-25-upcoming-forecast>. Acesso em: 31 mar. 2026.
- PEREIRA, V. A. S.; & CAMARGO, P. O. (2017). Estimativa e análise de índices de irregularidades da ionosfera utilizando dados GPS de redes ativas. *Boletim De Ciencias Geodesicas*, Universidade Federal do Paraná, v. 19, n. 3, p. 374– 390, set. 2013. <https://doi.org/10.1590/s1982-21702013000300002>.
- PEREIRA, V. A. S. (2018). *Investigação da usabilidade do GBAS no Brasil*. Universidade Estadual Paulista (Unesp). <http://hdl.handle.net/11449/158339>.
- PROL, F. S.; HOQUE, M. M.; HERNÁNDEZ-PAJARES, M.; YUAN, L.; OLIVARES-PULIDO, G.; VON

- ENGELN, A.; MARQUARDT, C.; & NOTARPIETRO, R. (2023). Study of Ionospheric Bending Angle and Scintillation Profiles Derived by GNSS Radio-Occultation with MetOp-A Satellite. *Remote Sensing*, 15(6), 1663. <https://doi.org/10.3390/rs15061663>.
- RODRIGUES, F. S. (2003). *Estudo das irregularidades ionosféricas equatoriais utilizando GPS*. [Dissertação de mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais]. Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia. https://www.oasisbr.ibict.br/vufind/Record/BRCRIS_b60e51155779187daa07ba04edf6fe62.
- ROCKEN, C.; KUO, Y.-H.; SCHREINER, W.; HUNT, D.; & SOKOLOVSKIY, S. (2000). COSMIC System Description. *Special issue of Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Science*, 11(1), 21-52.
- SEEBER, G. (2003). *Satellite Geodesy: Foundations, Methods, and Applications*. Berlin, New York: Walter de Gruyter.
- SEO, J.; WALTER, T.; CHIOU, T.; & ENGE, P. (2009). Characteristics of deep GPS signal fading due to ionospheric scintillation for aviation receiver design. *Radio Science*, 44:RS0A16. doi:10.1029/2008RS004077.
- SOLAR INFLUENCES DATA ANALYSIS CENTER (SIDC). (2026). *Daily and monthly sunspot number (last 13 years)*. Disponível em: <http://www.sidc.be/silso/dayssnplot>. Acesso em: 31 mar. 2026.
- SPOGLI, L.; ALFONSI, L.; CILLIERS, P. J.; CORREIA, E.; DE FRANCESCHI, G.; MITCHELL, C. N.; ROMANO, V.; KINRADE, J.; & CABRERA, M. A. (2013). GPS scintillations and total electron content climatology in the southern low, middle and high latitude regions. *Annals of Geophysics*. 56:R0220. doi: 10.4401/ag-6240.
- SREEJA, V. V.; AQUINO, M.; FORTE, B.; ELMAS, Z.; HANCOCK, C.; DE FRANCESCHI, G.; ALFONSI, L.; SPOGLI, L.; ROMANO, V.; BOUGARD, B.; MONICO, J. F. G.; WERNICK, A. W.; SLEEWAEGER, J. M.; CANTO, A.; & DA SILVA, E. F. (2011). Tackling ionospheric scintillation threat to GNSS in Latin America. *Journal of Space Weather and Space Climate*. 1:(A5). doi: 10.1051/swsc/2011005.
- SYNDERGAARD, S. (2025). *COSMIC S4 Data*. https://cdaacwww.cosmic.ucar.edu/cdaac/doc/documents/s4_description.pdf.
- SYNDERGAARD, S. (2000). On the ionosphere calibration in GPS radio occultation measurements. *Radio Science*, v. 35, p. 865-883.
- TANG, L.; LI, J.; ZHANG, F.; & ZOU, F. (2023). Comparative study of ionospheric sporadic E occurrence rates using SNR_{nstd} and S4 derived from GPS radio occultation. *GPS Solutions*, 27, 120. <https://doi.org/10.1007/s10291-023-01464-y>.
- VAN DIERENDONCK, A. J., KLOBUCHAR, J., & HUA, Q. (1993). Ionospheric Scintillation Monitoring Using Commercial Single Frequency C/A Code Receivers. Proceedings of the 6th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 1993), Salt Lake City, UT. 1333-1342.
- VANI, B. C. (2018). *Investigação sobre Modelagem, Mitigação e Predição de Cintilação Ionosférica na Região Brasileira*. [Tese de doutorado, Universidade Estadual]. Repositório Institucional UNESP. <https://repositorio.unesp.br/items/7479018c-2da4-4635-b6d2-f06d5c573b01>.
- VANI, B. C.; FORTE, B.; MONICO, J. F. G.; SKONE, S.; SHIMABUKURO, M. H.; MORAES, A. O.; PORTELLA, I. P.; & MARQUES, H. A. (2019). A novel approach to improve GNSS Precise Point Positioning during strong ionospheric scintillation: theory and demonstration. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 68(5):4391-4403. doi: 10.1109/TVT.2019.2903988.
- VANI, B. C.; SHIMABUKURO, M. H.; & MONICO, J. F. G. (2017). Visual exploration and analysis of ionospheric scintillation monitoring data: The ISMR Query Tool. *Computers & Geosciences*. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2016.08.022>.
- VITAL, L. F. R.; TAKAHASHI, H.; BARROS, D.; CARMO, C. S.; CARRASCO, A. J.; WRASSE, C. M.; & FIGUEIREDO, C. A. O. B. (2024). Seasonal and solar cycle dependency of relationship between equatorial plasma Bubbles and Rayleigh-Taylor instability growth rate. *Space Weather*, 22,

e2024SW003959. <https://doi.org/10.1029/2024SW003959>.

WANNINGER, L. (1993). Effects of the equatorial ionosphere on GPS. *GPS World*, v.4, n.7, p.48-54.

WANG, K.; EL-MOWAFY, A.; WANG, W.; YANG, L.; & YANG, X. (2022). Integrity Monitoring of PPP-RTK Positioning; Part II: LEO Augmentation. *Remote Sensing*, 14(7), 1599. <https://doi.org/10.3390/rs14071599>.

WERNIK, A. W.; SECAN, J. A.; & FREMOUW, E. J. (2003). Ionospheric irregularities and scintillation. *Advances in Space Research*. 31(4):971–981. doi: 10.1016/S0273- 1177(02)00795-0.

WILKS, D. S. (2006). Statistical Methods in the Atmospheric Sciences. 3. ed. Amsterdam: Academic Press. International Geophysics Series, v. 100.

WU, D. L. (2020). Ionospheric S4 Scintillations from GNSS Radio Occultation (RO) at Slant Path. *Remote Sensing*, 12, 2373. <https://doi.org/10.3390/rs12152373>.

YAMAZAKI, Y., ARRAS, C., ANDOH, S., MIYOSHI, Y., SHINAGAWA, H., HARDING, B. J., ENGLERT, C. R.; IMMEL, T. J.; SOBHAKHIZ-MIANDEHI, S.; & STOLLE, C. (2022). Examining the wind shear theory of sporadic E with ICON/ MIGHTI winds and COSMIC-2 radio occultation data. *Geophysical Research Letters*, 49, e2021GL096202. <https://doi.org/10.1029/2021GL096202>.

ZENG, Z.; & SOKOLOVSKIY, S. (2010). Effect of sporadic E clouds on GPS radio occultation signals. *Geophysical Research Letters*, v. 37, n. 18.

Biografia do autor principal



Raphael Silva Nespolo possui graduação em Engenharia Cartográfica e de Agrimensura (2023) pela Universidade Estadual Paulista (UNESP), onde atualmente cursa mestrado em Ciências Cartográficas. Sua formação acadêmica está voltada à área de Geociências, com ênfase em sistemas de navegação por satélite e estudos da atmosfera terrestre. Desenvolve pesquisas relacionadas à técnica de rádio ocultação GNSS, com foco na análise de parâmetros atmosféricos. Seus interesses incluem rádio ocultação GNSS, atmosfera terrestre e posicionamento GNSS.



Esta obra está licenciada com uma Licença [Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) – CC BY. Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.